# اندرکنش هرم رأس ستون و اتصال ویژهٔ پیش‌ساختهٔ فولادی در بارگذاری متناوب*

مرتضی کاظمی تربقان[۱] محمدرضا سهرابی[۲] حسن حاجی کاظمی[۳]

**چکیده** *اتصالات ویژهٔ پیش‌ساخته شامل رأس هرمی یکی از نوآوری‌ها در زمینهٔ اتصالات فولادی پیش‌ساخته می‌باشد که برای دقت در نصب و سرعت اجرا پیشنهاد شده است. در این مقاله به بررسی اندرکنش بین اتصال فرم سازه‌ای پیش‌ساختهٔ مدولار فلزی و قسمت هرمی شکل پرداخته می‌شود. برای این منظور قسمت هرمی شکل با ابعاد مختلف در نرم‌افزار آباکوس که صحت‌سنجی آن توسط نتایج یک نمونهٔ آزمایشگاهی صورت گرفته است مدل‌سازی می‌شود و تحت بارگذاری تناوبی برأساس آیین‌نامهٔ ATC-24 قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها قادر به تحمل دوران بیشتر از ۰/۰۱ رادیان در قسمت خطی و حداقل ۰/۰٦ رادیان بدون کاهش در مقدار نیروی قابل تحمل می‌باشند که نشان‌دهندهٔ ظرفیت دورانی بالای این اتصال می‌باشد و همچنین بیانگر آن است که این فرم سازه‌ای جزء قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری ویژه محسوب می‌گردد. بیشترین ظرفیت جذب انرژی مربوط به نمونه‌ای می‌باشد که قسمت هرمی‌شکل برروی صفحهٔ اتصال ستون پایین و یک مقطع قوطی‌شکل برروی صفحهٔ اتصال ستون بالا قرار داشته باشد. عدم‌استفاده از تکیه‌گاه جانبی در تیر، می‌تواند سبب پیچش در تیر و کاهش ۴۲درصدی مقاومت اتصال گردد.*

**واژه‌های کلیدی** اتصال جدید، اندرکنش، ستون با رأس هرمی، بارگذاری تناوبی.

# Interactions of the Column Pyramid Head and Special Prefabricated Steel Connection under Cyclic Loading

M. Kazemi Torbaghan M. R. Sohrabi H. Haji Kazemi

**Abstract** *Special prefabricated connections and pyramid-shaped column heads are important innovations in steel structural forms. These connections have been proposed for accurate assembly and prompt implementation. In this study, the interactions between the two parts of connections have been investigated. For this purpose, the pyramid-shaped part is modeled in the ABAQUS software with different dimensions and under cyclic loads according to ATC-24 code. For verification of the software outputs, the outputs of the software have been compared to the experimental results. The results show that all specimens can bear a 0.01 radian rotation in the linear region and at least 0.06 radian rotation without a reduction in the tolerated force. These results demonstrate that the connection has a high rotational capacity and may be classified in the special moment frames. Maximum energy absorption capacity occurs in the specimen whose pyramid-shaped part is placed on the flange of the lower column and a box section is also placed on the flange of the upper column. Beams without lateral support show 42 percent reduction in connection resistance compared with un-rotated beams due to rotation.*

**Key Words** New Connection, Interaction, Column with Pyramid Head, Cyclic Loading.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۴/۱۰/۱۳ و تاریخ پذیرش ۹٦/۲/۱۱ آن می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

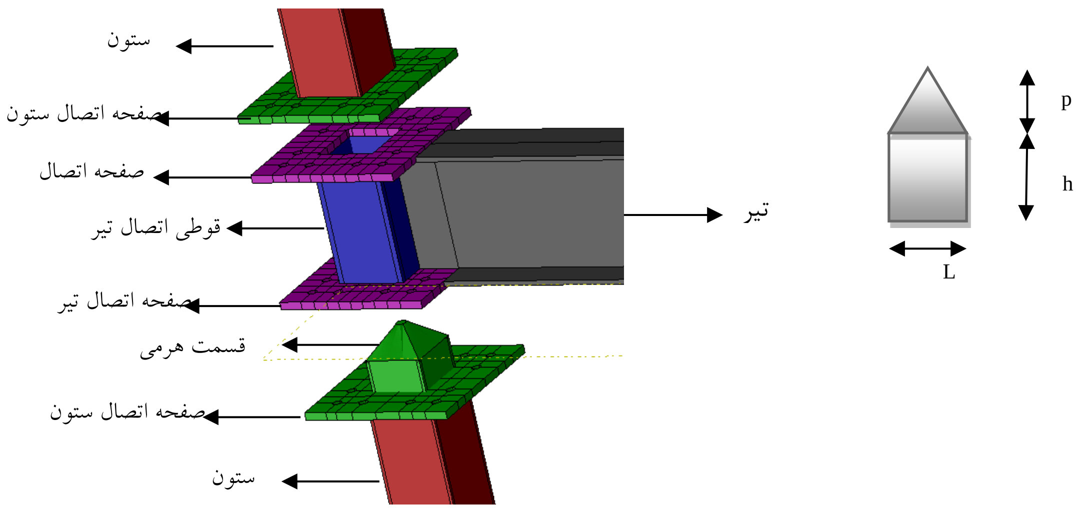
(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

Email: sohrabi@hamoon.usb.ac.ir

(۳) استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد.

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در زمینهٔ افزایش بهره‌وری در صنعت ساختمان تأثیرگذار است، امکان استفاده از مصالح نوین و روش‌های جدید ساخت می‌باشد. در این پژوهش اتصالات یکی از فرم‌های سازه‌ای فولادی مدولار پیش‌ساخته که در آن تمامی مراحل ساخت اعضا در کارخانه صورت می‌گیرد و سپس به محل اجرای پروژه حمل می‌گردد و به‌وسیلهٔ پیچ به یکدیگر متصل می‌شوند موردبررسی قرار می‌گیرد. این فرم سازه‌ای از ستون‌هایی قوطی‌شکل تشکیل شده است که در انتهای آنها صفحات اتصال افقی قرار گرفته است و تیرهایی که در انتهای آنها مقطعی قوطی‌شکل است که در بالا و پایین به صفحات اتصال متصل شده‌اند. در این پژوهش با توجه به آنکه این فرم کاملاً پیش‌ساخته می‌باشد و در محل پروژه تمامی اجزا به یکدیگر متصل می‌شوند، به جهت سهولت در اجرا یک روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. در این روش از یک قسمت هرمی‌شکل برروی صفحهٔ اتصال ستون استفاده می‌گردد که قسمت قوطی‌شکل تیر درون آن قرار می‌گیرد و اجرای سازه را خیلی راحت‌تر و دقیق‌تر می‌سازد. شکل (۱) اجزا و نحوهٔ اجرای اتصال را نشان می‌دهد. پس از آن به بررسی اندرکنش بین قسمت هرمی‌شکل و اتصال تحت بار متناوب پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا اتصال در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس که صحت‌سنجی آن توسط نتایج یک نمونه آزمایشگاهی صورت گرفته است مدل‌سازی می‌شود و تحت بار تناوبی قرار می‌گیرد. سپس نمودارهای نیرو-تغییرمکان و لنگر دوران مربوط به آن رسم می‌شود و پس از آن قسمت هرمی‌شکل با ابعاد و اندازه‌های مختلف به اتصال اضافه می‌گردد و در هر حالت نمودارهای مربوط رسم و با حالت بدون قسمت هرمی شکل مقایسه می‌گردد. به‌منظور بررسی اثر تکیه‌گاه جانبی در تیر بر نمودارهای ذکرشده تمامی نمونه‌ها در دو حالت با و بدون تکیه‌گاه جانبی مورد بررسی قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است که ضخامت ورق‌های انتخاب‌شده این مقاله بر اساس پژوهش دیگری که توسط محققین صورت گرفته است انتخاب شده است. که در دست چاپ می‌باشند. درادامه برخی از پژوهش‌های صورت‌گرفته ارائه می‌شود.




شکل ۱ اجزای اتصال و ابعاد قسمت هرمی‌شکل

براوو و هریرا [1] عملکرد لرزه‌ای اتصال T-stubs را تحت بارگذاری تناوبی مورد بررسی قرار دادند. آنها ۲۰ نمونه از اتصال T-stubs را با مقیاس یک‌به‌نیم تحت بارگذاری تناوبی و یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود مشابه شرایط آزمایشگاهی که نتایج آن قبلاً با نمونهٔ آزمایشگاهی کنترل شده بود نیز موردبررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی افزایش مقاومت را نسبت به طراحی‌های موردانتظار و همچنین تفاوت بین مدهای شکست قابل‌انتظار و واقعی را نشان می‌دهد. سوفیاس و همکاران [2] به بررسی آزمایشگاهی و اجزای محدودی اتصال با ورق انتهایی با مقطع تیر کاهش‌یافته پرداختند. نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین مدل آزمایشگاهی و مدل اجزای محدودی می‌باشد. یانگ و کیم [3] به بررسی آزمایشگاهی رفتار سه نوع اتصال تحت بارگذاری سیکلی پرداختند. یک نوع از این اتصالات جوشی و دو نوع دیگر پیچی بودند. در اتصال جوشی تیر به‌صورت مستقیم به ستون جوش شده و در اتصالات پیچی در یکی از آنها اتصال به‌وسیلهٔ نبشی جان و در دیگری اتصال به‌وسیلهٔ نبشی جان و نبشی بالا و پایین صورت گرفته بود. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد اتصال جوش‌شده بهتر از دو اتصال دیگر می‌باشد. لیو و همکاران [4] به بررسی استاتیکی و لرزه‌ای اتصال مدولار پیش‌ساختهٔ فلزی به‌صورت آزمایشگاهی پرداختند. در این اتصال تیرها به‌صورت خرپاشکل بودند که از دو مقطع نبشی در بالا به‌عنوان بال کششی و دو مقطع نبشی در پایین به‌عنوان بال فشاری استفاده شده بود. این نبشی‌ها به‌وسیلهٔ نبشی‌هایی مورب به‌عنوان جان تیر به یکدیگر متصل شده بودند. نتایج نشان می‌دهد که با بزرگ‌تر شدن مقطع نبشی‌های بال و همچنین نبشی‌های جان عملکرد اتصال بهبود پیدا می‌کند.

تحلیل اتصالات به‌دلیل پیچیده بودن تغییرشکل‌ها در نواحی مختلف، رفتار غیرخطی هندسی و مصالح حتی در بارگذاری‌های کوچک، مودهای گسیختگی مختلف و... بسیار دشوار است و از طرفی انجام آزمایش برای نمونه‌های مختلف غیرعملی، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد. لذا باتوجه به رشد کمی و کیفی نرم‌افزارهای اجزای محدود و توانمندی بالای آنها در انجام تحلیل‌های پیچیده، استفاده از نرم‌افزارهای مختلف اجزای محدود از جمله ANSYS و ABAQUS از مناسب‌ترین گزینه‌های پیش‌روی پژوهشگران می‌باشد. این نرم‌افزارها می‌توانند به‌راحتی رفتار اتصالات پیچیده را مدل‌سازی کنند و پارامترهای لازم را به‌عنوان خروجی ارائه نمایند. در استفاده از این نرم‌افزارها بایستی مواردی از جمله نوع المان، ابعاد المان، نوع و نحوهٔ مش‌بندی، نوع بارگذاری، تعریف رفتار مصالح موردنظر و... مورددقت قرار بگیرند تا نتایج حاصل، نتایج صحیح و قابل‌قبولی باشند. درادامه به بررسی برخی از تحقیقات صورت‌گرفته برروی اتصالات فلزی بااستفاده از نرم‌افزارهای اجزای محدود پرداخته می‌شود.

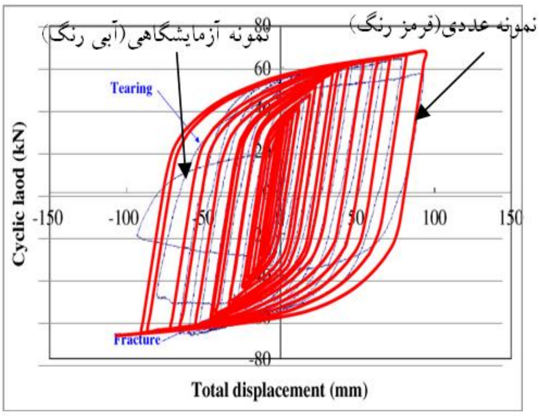
قاسمیه و همکاران [5] بااستفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس به بررسی عددی اتصالات با ورق‌های انتهایی تحت بارهای سیکلی پرداختند. آنها درابتدا برای صحت‌سنجی نتایج را با یک مدل آزمایشگاهی مقایسه نمودند و سپس به مدل‌سازی با نرم‌افزار پرداختند. آنها بیان نموده‌اند که تغییر ابعاد اعضای اتصال برروی پاسخ لرزه‌ای اتصال تأثیر می‌گذارد، به‌طوری‌که افزایش عمق ستون و سختی اتصال سبب بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌شود. همچنین ضخامت ورق‌های انتهایی باید طوری انتخاب گردد که ظرفیت آنها از لنگر پلاستیک تیر بزرگ‌تر باشد. الهندی وسلیکیج [6] تلاش نموده‌اند تا بتوانند بااستفاده از تغییر در شکل هندسی اتصال ناودانی معکوس (RCC) منحنی لنگر- دوران اتصال را بهبود ببخشند. آنها از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس برای مدل‌سازی استفاده نمودند. تأکید اصلی آنها برروی سختی، مقاومت، عوامل شکل‌پذیری، ظرفیت دوران و مکانیک شکست اتصال بود. نتایج نشان می‌دهد که تمامی نمونه‌ها دارای حداقل ظرفیت دوران ۰/۰۳ رادیان، و در بیشتر موارد ۰/۰٦ رادیان و در یک مورد

۱/٦ رادیان می‌باشد. اسواتی و گارانج [7] به بررسی دو نوع اتصال که عبارت بودند از اتصال تیر به ستون با مقطع بال کاهش‌یافته و بدون مقطع بال کاهش‌یافته تحت بارگذاری سیکلی پرداختند. اتصال با مقطع کاهش‌یافته در ایالات متحده، ژاپن و اروپا صورت گرفته بود، اما آزمایش برروی این نوع اتصال برای مقاطع هندوستان انجام نشده بود. آنها برای صحت‌سنجی نتایج یک مدل اجزای محدود را با نمونهٔ آزمایشگاهی مقایسه نمودند و سپس مدل‌سازی‌ها صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد که اتصال بدون مقطع بال کاهش‌یافته دارای عملکرد ضعیفی می‌باشد به‌طوری‌که، ترک‌ها از قسمت جوش فلنچ پایین آغاز می‌شود اما اتصال با مقطع بال کاهش‌یافته قابلیت تحمل ۰/۰۲ رادیان را بدون آن‌که در جوش خرابی اتفاقی بیفتد دارد. گرامی و همکاران [8] به بررسی اثر آرایش پیچ‌ها در اتصالات فولادی با ورق‌های انتهایی و T-Stub تحت اثر بارهای تناوبی پرداختند. آنها ١٤ نمونه از اتصالات ذکرشده را با تغییر در ترتیب قرارگیری پیچ‌ها در جهت افقی و قائم را به‌روش اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند، نتایج بیانگر آن است که ظرفیت لنگر و سختی دورانی اتصال T-Stub بیشتر از اتصال با ورق‌های انتهایی می‌باشد. شی و همکاران [9] هشت نمونه اتصال با پیچ‌های پیش‌تنیده را در نرم‌افزار ANSYS تحت بار چرخه‌ای مدل‌سازی نمودند. نتایج حاصل نشان‌دهندهٔ تطابق خوب بین مدل اجزای محدودی و مدل آزمایشگاهی می‌باشد.

باتوجه به آن‌که مقطع ستون اتصال مورد بررسی قوطی‌شکل می‌باشد در این قسمت به بررسی تعدادی از پژوهش‌های انجام‌شده بر روی اتصال صلب با مقطع ستون قوطی‌شکل پرداخته می‌شود. از آن جمله می‌توان به تحقیقات انجام‌شده توسط استلکو [10] درخصوص تقویت اتصال صلب تیر به ستون قوطی بااستفاده از ورق‌های یک‌پارچه روی تیرها اشاره نمود. میورا و ماکینو [11] برای محاسبهٔ ظرفیت تغییرشکل پلاستیک، و مقاومت خمشی نهایی نوع خاصی از اتصال تیر I شکل به ستون قوطی، آزمایش‌هایی برروی مدل‌هایی با مقیاس واقعی انجام نمودند و منحنی‌های هیسترسیس رفتار اتصال را رسم نمودند. از جدیدترین مطالعات انجام‌گرفته برروی اتصال تیرهای I شکل به ستون قوطی برای مناطق لرزه‌خیز می‌توان به مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام‌شده توسط گوسوامی و مورتی [12] اشاره نمود. در این مطالعات برای تقویت اتصال از ورق‌های لچکی مورب برروی بال‌های فوقانی و تحتانی تیر استفاده شده است و رفتار اتصال پیشنهادی با اتصالات معمول مقایسه گردیده است.

## صحت‌سنجی

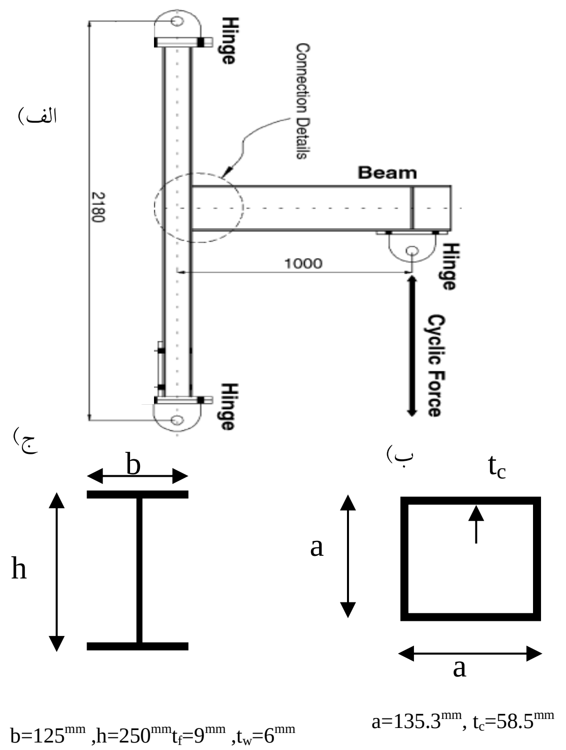
به‌منظور صحت‌سنجی نرم‌افزار، و نحوهٔ مدل‌سازی، نمونهٔ مورد آزمایش یانگ و کی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی گردید. فولاد استفاده‌شده برای مقاطع اتصال از نوع SS400 می‌باشد. ابعاد و اندازهٔ اجزای اتصال باتوجه به مقادیر ارائه‌شده در نمونهٔ آزمایشگاهی مدل‌سازی گردید [3]. شکل (۲) منحنی نیرو–تغییرمکان را برای نمونهٔ اجزای محدود و نمونهٔ آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تطابق بسیارخوبی بین نتایج حاصل از نمونهٔ اجزای محدود و نمونهٔ آزمایشگاهی برقرار می‌باشد.




شکل ۲ منحنی نیرو– تغییرمکان نمونهٔ آزمایشگاهی و عددی

## مدل‌سازی اتصال

نمونهٔ قاب مقاوم خمشی انتخاب‌شده [3]، ابعاد و مقطع تیر و ستون و نحوهٔ مدل‌سازی اتصال در شکل (۳) نشان داده شده است. تمامی مقاطع استفاده‌شده در این تحقیق شامل ستون‌ها، تیرها، ورق‌های انتهایی، مقطع قوطی و قسمت هرمی‌شکل از فولاد SS400 و تمامی پیچ‌های استفاده‌شده از نوع پرمقاومت A490 است که مشخصات آنها در جدول (۱) ارائه شده است [3,8]. مدول الاستیسیته برای تمامی مقاطع برابر با 200 GPa و ضریب پواسون برابر با ۰/۳ است. بارگذاری در دو مرحله صورت گرفته است، در مرحلهٔ اول باتوجه به نوع و سایز پیچ‌ها نیروی پیش‌تنیدگی ۱۰۷ کیلونیوتن به پیچ‌ها اعمال می‌شود [13] و در مرحلهٔ دوم تغییرمکانها طبق ضوابط آیین‌نامهٔ بارگذاری ATC-24 به انتهای تیر وارد می‌گردد [14] که مقادیر آن در جدول (۲) قابل‌مشاهده می‌باشد. باتوجه به اینکه در تمامی قطعات ضخامت نسبت به سایر ابعاد کوچک می‌باشد، درنتیجه برای مدل‌سازی قطعات از المان Shell و مدل‌سازی پیچ‌ها از المان Solid استفاده شده است که قبلاً صحت‌سنجی اندرکنش بین این دو نوع المان انجام شده است. همچنین برای آنکه مدل‌سازی پیچیده نشود و بتوان از نوع مش‌بندی Structural که نسبت به سایر انواع مش‌بندی دارای دقت بالاتری می‌باشد استفاده نمود، قطعات به‌صورت جداگانه ترسیم و سپس بااستفاده از تماس نوع Tie به یکدیگر متصل شده‌اند. تماس بین پیچ‌ها و جدارهٔ صفحات به‌صورت General contact و از نوع Penalty با ضریب اصطکاک ۰/۵ درنظر گرفته شده است [13].




شکل ۳ الف) نمونهٔ قاب خمشی، ب) مقطع ابعاد ستون، ج) مقطع و ابعاد تیر

جدول ۱ مشخصات فولاد و پیچ‌های مصرفی [3,8]

| مواد | مقاطع | تنش (مگاپاسکال) | کرنش |
|---|---|---|---|
| SS400 | تیر، ستون، ورق‌های اتصال، قوطی و قسمت هرمی‌شکل | ۳۳۲ | ۰/۰۰۱۷۸ |
| | | ۳۳۲ | ۰/۰۱۹۶ |
| | | ۴۵۰ | ۰/۲۱۳۴ |
| A490 | پیچ‌ها | ۷۹۴ | ۰/۰۰۳۸۶ |
| | | ۱۰۳۵ | ۰/۰۱۳۵ |
| | | ۱۰۳۵ | ۰/۰۳۰۹ |
| | | ۱۰۴۸ | ۰/۲ |

جدول ۲ مراحل بارگذاری در انتهای تیر

| شمارهٔ مرحله | ۱ | ۲ | ۳ | ... | ۶ | ... | ۹ | ۱۰ | ... | ۱۳ | ۱۴ | ... | ۱۸ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تغییرمکان (میلی‌متر) | ±۳ | ±۶ | ±۹ | ... | ±۱۸ | ... | ±۳۰ | ±۳۵ | ... | ±۵۰ | ±۶۰ | ... | ±۱۰۰ |

جدول ۳ نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی‌شده

| g (mm) | b (mm) | L (mm) | p (mm) | h (mm) | ضخامت ورق‌های اتصال(mm) | نمونه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| - | - | – | - | - | ۱۵ | C0 |
| ۱ | - | ۱۱۳/۳ | ۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵ | C1h150p50g1 |
| ۵ | - | ۱۰۵/۳ | ۵۰ | ۱۵۰ | ۱۵ | C2h150p50g5 |
| ۱ | - | ۱۱۳/۳ | ۵۰ | ۷۵ | ۱۵ | C3h75p50g1 |
| ۵ | - | ۱۰۵/۳ | ۵۰ | ۷۵ | ۱۵ | C4h75p50g5 |
| ۱ | - | ۱۱۳/۳ | ۵۰ | ۷۵ | ۱۵ | C5h75h75p50g1 |
| ۵ | - | ۱۰۵/۳ | ۵۰ | ۷۵ | ۱۵ | C6h75h75p50g5 |
| ۱* | ۲۳۰ | ۱۱۳/۳ | ۵۰ | ۷۵ | ۱۵ | C7h75p50b230g1 |

نام‌گذاری نمونه‌های مدل‌سازی شده در جدول (۳) ارائه شده است.

نام‌گذاری نمونه‌ها به‌صورت زیر می باشد:

۱. نمونه‌هایی که دارای دو حرف h می‌باشند دارای دو عضو هرمی‌شکل یکی برروی ورق انتهایی ستون بالا و یکی برروی ورق انتهایی ستون پایین می‌باشند.

۲. عدد بعد از حرف h معرف ارتفاع قسمت مکعبی‌شکل قسمت هرمی‌شکل می‌باشد.

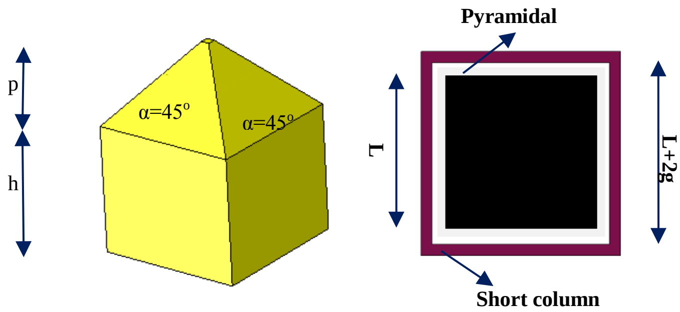
۳. عدد بعد از حرف p معرف ارتفاع قسمت هرمی‌شکل قسمت هرمی‌شکل می‌باشد.

۴. نمونه‌ای که دارای حرف b می‌باشد شامل یک مقطع قوطی شکل متصل‌شده به ورق‌های اتصال ستون طبقهٔ بالا می‌باشد و عدد بعد از آن معرف ارتفاع این مقطع قوطی می‌باشد.

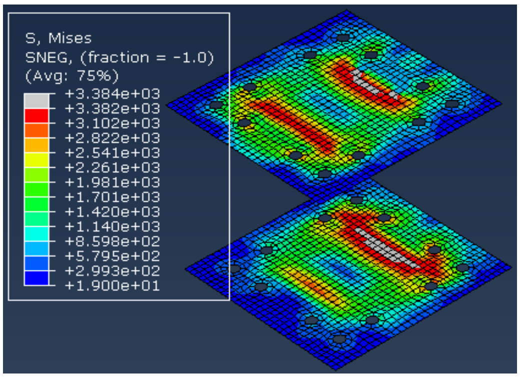
۵. عدد بعد از حرف g معرف فاصلهٔ آزاد بین زائدهٔ هرمی‌شکل و وجه داخلی قوطی اتصال می‌باشد که به‌صورت شماتیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

در نمونهٔ C0 هنگامی که مقدار نیروی وارد به انتهای تیر برابر با ۷۱/۶۲ کیلونیوتن باشد اولین عضوی

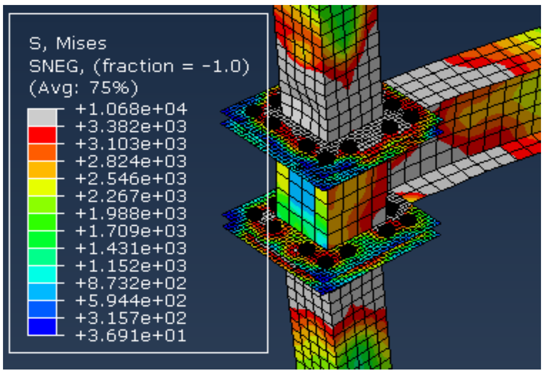
از اتصال که تنش در آن به تنش تسلیم می‌رسد ورق‌های انتهایی ستون می‌باشد. باافزایش نیرو تنش در سایر اعضا نیز به تنش تسلیم می‌رسد اما هیچ‌کدام دچار گسیختگی نمی‌گردد. نیرویی که سبب تغییرمکان ۱۰۰ میلی‌متر در انتهای تیر می‌گردد برابر با ۱۱۳/۷۳ کیلونیوتن می‌باشد. شکل‌های (۵) و (٦) توزیع تنش فون میسیز در اجزای اتصال و شکل (۷) منحنی نیرو- تغییرمکان اتصال را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که واحد تنش در تمامی شکل‌ها کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.



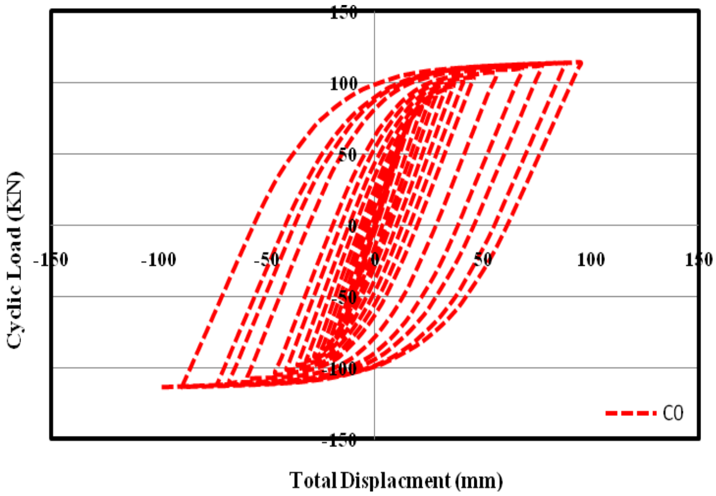

شکل ٤ پارامترهای نام‌گذاری



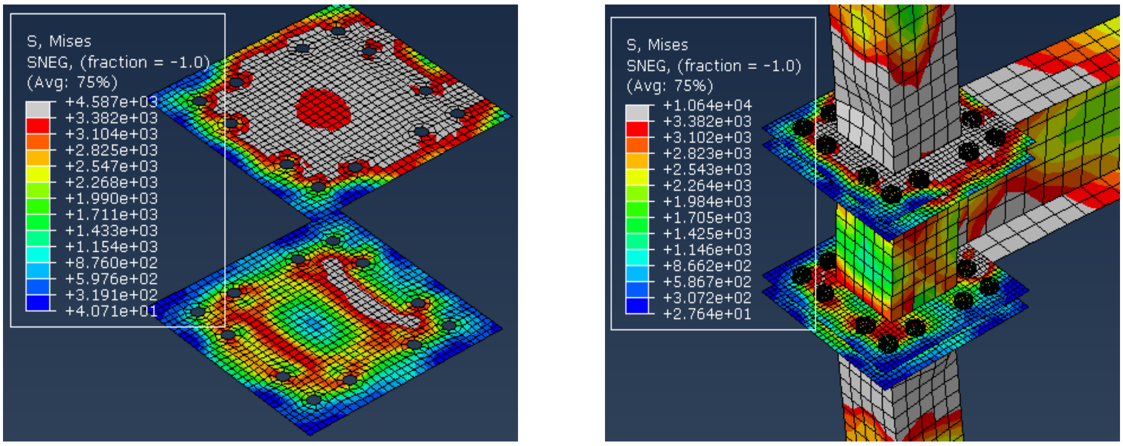

شکل ۵ توزیع تنش فون میسیز در اتصال C0 (شروع تسلیم)



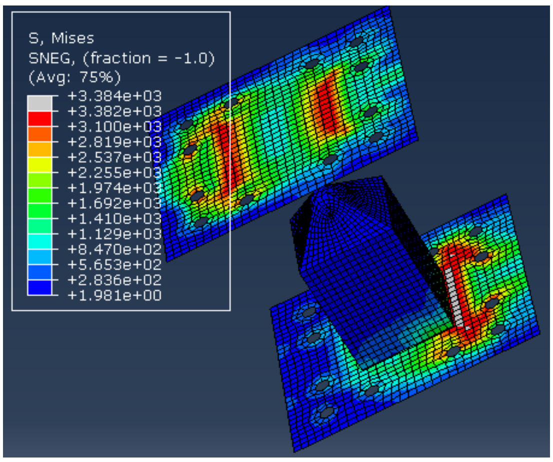

شکل ٦ توزیع تنش فون میسیز در اتصال C0 (تغییر مکان ۱۰۰میلی‌متر)



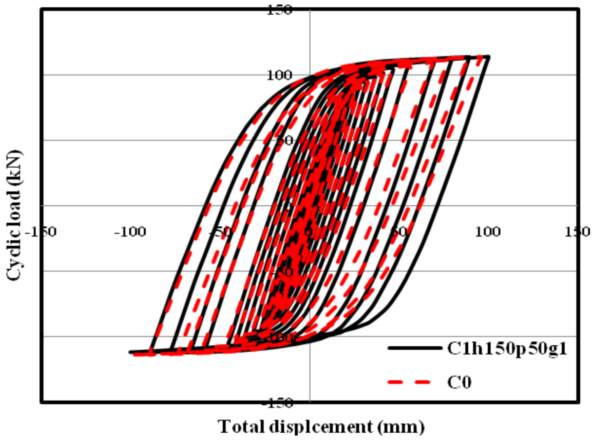

شکل ۷ منحنی نیرو تغییرمکان در اتصال C0




شکل ۸ توزیع تنش فون میسیز در اتصال C1h150p50g1 (تغییرمکان ۱۰۰ میلی‌متر)



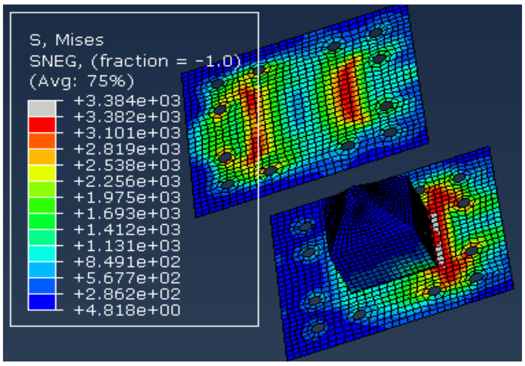

شکل ۹ توزیع تنش فون میسیز در اتصال C1h150p50g1 (شروع تسلیم)



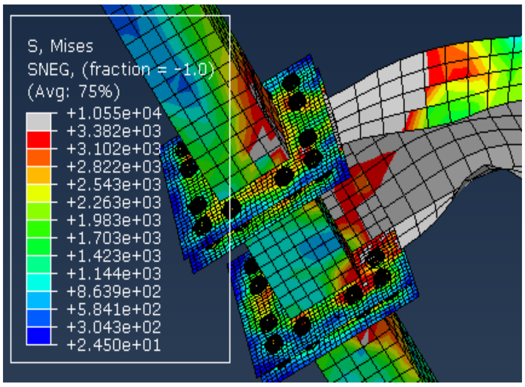

شکل ۱۰ منحنی نیرو تغییر مکان در اتصال C1h150p50g1

در نمونهٔ C1h150p50g1 هنگامی‌که نیروی وارد برابر با ۷۲/۹۱ کیلونیوتن است اولین مقطعی که تنش آن به تنش تسلیم می‌رسد ورق پایین انتهای ستون می‌باشد. در این مرحله ورق بالای انتهای ستون هنوز به تنش تسلیم نرسیده است. با افزایش نیرو تنش در سایر مقاطع نیز به تنش تسلیم می‌رسد اما هیچ عضوی دچار گسیختگی نمی‌گردد. بیشترین نیروی قابل‌تحمل اتصال در این حالت برابر با ۱۱۳/۹۳ کیلونیوتن و نیرویی که سبب تغییرمکان ۱۰۰میلی‌متر در انتهای تیر می‌گردد برابر با ۱۱۱/۳۵کیلونیوتن می‌باشد. نکتهٔ قابل‌توجه کاهش تنش ورق انتهای ستونی که قسمت هرمی‌شکل بر روی آن قرار گرفته است می‌باشد. شکل‌های (۸) و (۹) توزیع تنش فون میسیز در اجزای اتصال و شکل (۱۰) منحنی نیرو-تغییرمکان اتصال را نشان می‌دهد.

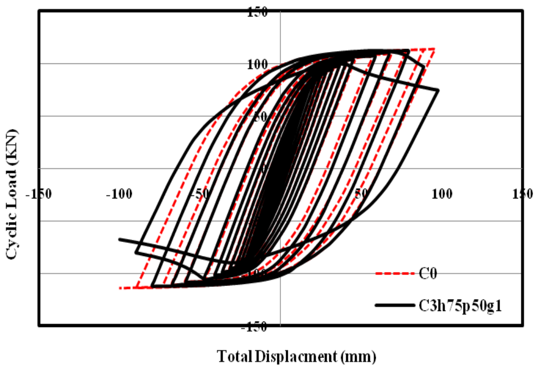
در نمونهٔ C3h75p50g1 هنگامی‌که نیروی وارد برابر با ۷۳/۰۳ کیلونیوتن است اولین مقطعی که تنش آن به تنش تسلیم می‌رسد ورق پایین انتهای ستون می‌باشد، در این مرحله ورق بالای انتهای ستون هنوز به تنش تسلیم نرسیده است. هنگامی‌که مقدار نیروی وارد به ۱۱۲/۰۳ کیلونیوتن می‌رسد در تیر مفصل پلاستیک ایجاد می‌شود و پس از آن تیر دچار پیچش می‌گردد و مقادیر نیرو کاهش پیدا می‌کند به‌طوری‌که نیرویی که سبب تغییرمکان ۱۰۰میلی‌متر می‌شود برابر با ٦٧/٦ کیلونیوتن می‌باشد. شکل‌های (۱۱) و (۱۲) توزیع تنش فون میسیز در اجزای اتصال و شکل (۱۳) منحنی نیرو-تغییرمکان اتصال را نشان می‌دهد.




شکل ۱۱ توزیع تنش فون میسیز در اتصال C1h75p50g1 (شروع تسلیم)

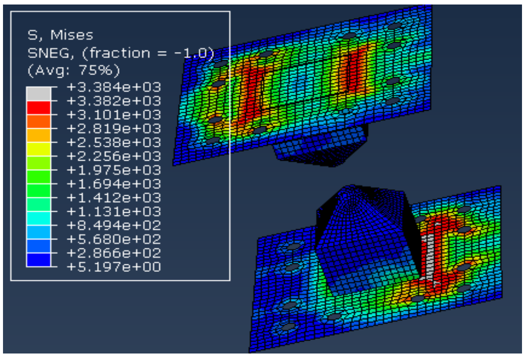



شکل ۱۲ توزیع تنش فون میسیز در اتصال C1h75p50g1 (تغییرمکان ۱۰۰میلی‌متر)

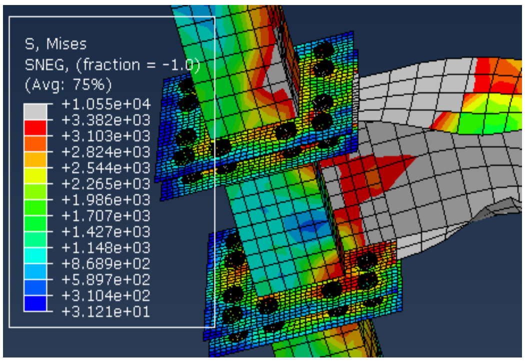



شکل ۱۳ منحنی نیرو- تغییرمکان در اتصال C3h75p50g1

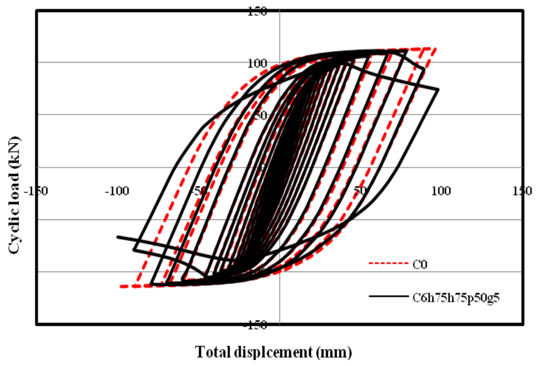
نمونه‌های C4h75p50g5، C5h75h75p50g1 و C6h75h75p50g5 بسیار مشابه نمونهٔ C3h75p50g1 می‌باشد. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) توزیع تنش فون میسز و شکل (۱٦) منحنی نیرو-تغییرمکان اتصال C6h75h75p50g5 را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.




شکل ۱٤ توزیع تنش فون میسز در اتصال C6h75h75p50g5 (شروع تسلیم)

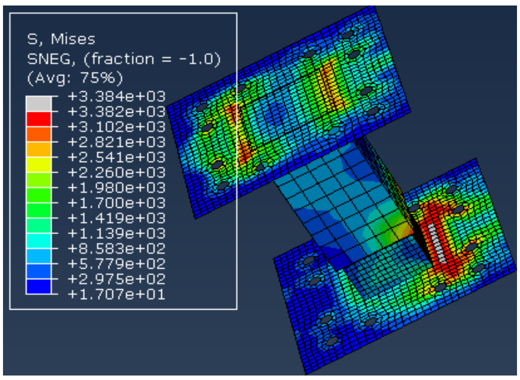



شکل ۱۵ توزیع تنش فون میسز در اتصال C6h75h75p50g5 (تغییرمکان ۱۰۰میلی‌متر)

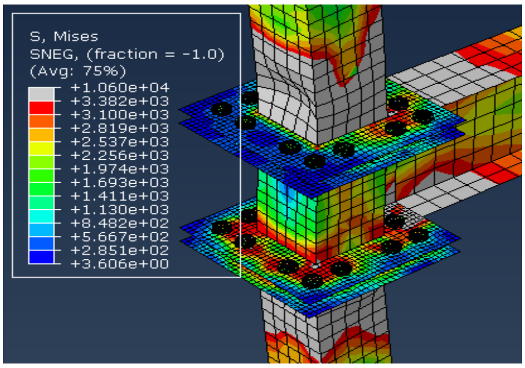



شکل ۱٦ منحنی نیرو- تغییرمکان در اتصال C6h75h75p50g5

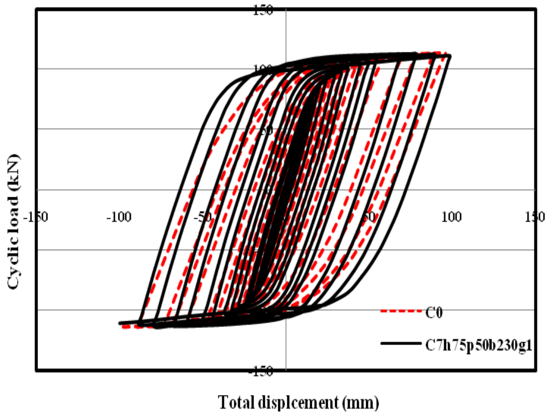
در نمونهٔ C7h75p50b230g1 هنگامی‌که نیروی وارد برابر با ۷٦/۰۷ کیلونیوتن گردد اولین مقطعی که تنش آن به تنش تسلیم می‌رسد ورق پایین انتهای ستون می‌باشد، در این مرحله ورق بالای انتهای ستون هنوز به تنش تسلیم نرسیده است. بیشترین نیروی قابل‌تحمل اتصال در این حالت برابر با ۱۱۳/۵۷ کیلونیوتن و نیرویی که سبب تغییرمکان ۱۰۰ میلی‌متر می‌گردد برابر با ۱۱۰/۹۱ کیلونیوتن می‌باشد. شکل‌های (۱۷) و (۱۸) توزیع تنش فون میسز در اجزای اتصال و شکل (۱۹) منحنی نیرو-تغییرمکان اتصال را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌گردد منحنی نیرو- تغییرمکان در این حالت دارای سطح زیر نمودار بیشتری است که نشان دهنده عملکرد بهتر و ظرفیت جذب انرژی بالاتر این نمونه اتصال نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد.




شکل ۱۷ توزیع تنش فون میسز در اتصال C7h75p50b230g1 (شروع تسلیم)



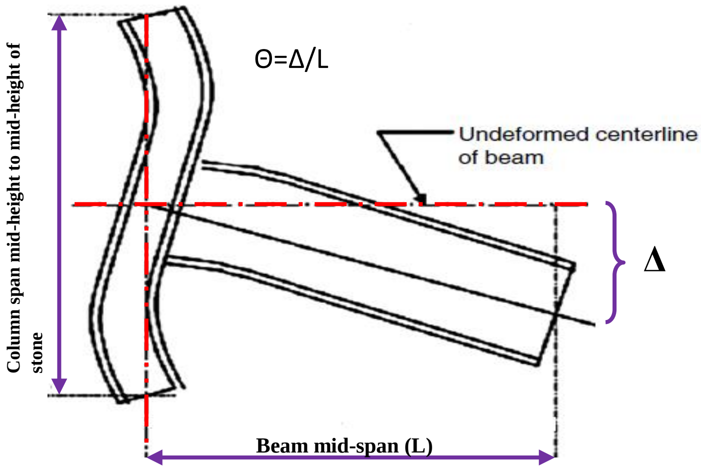

شکل ۱۸ توزیع تنش فون میسیز در اتصال C7h75p50b230g1 (تغییرمکان ۱۰۰میلی‌متر)



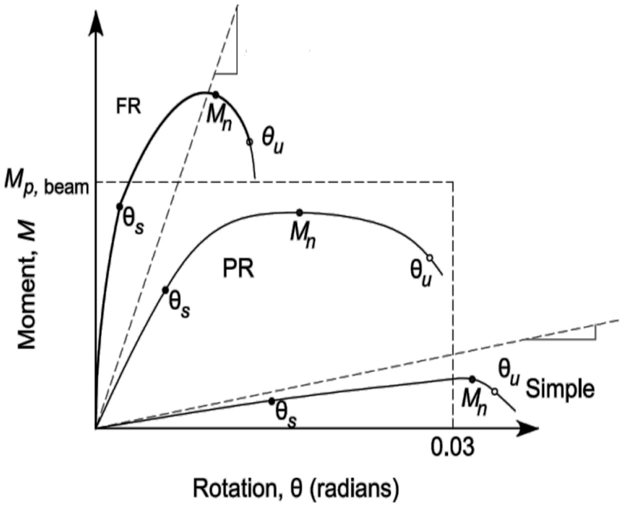

شکل ۱۹ منحنی نیرو- تغییرمکان در اتصال C7h75p50b230g1

تغییرمکان نسبی طبقه شامل چرخش‌های الاستیک و غیرالاستیک اجزای مدل می‌باشد. از آنجا که حداکثر لنگر در قاب‌های خمشی در ناحیهٔ اتصال تیر به ستون می‌باشد، عمدهٔ چرخش‌های غیرالاستیک در گره اتصال رخ می‌دهد که شامل چرخش‌های چشمهٔ اتصال، اجزای اتصال و قسمت ابتدایی تیر که مفصل پلاستیک را شامل می‌شود، می‌باشد. به‌همین‌دلیل فرض می‌شود که چرخش غیرالاستیک مدل تقریباً برابر چرخش گره اتصال است. نحوهٔ محاسبهٔ تغییرمکان نسبی طبقه در شکل (۲۰) نشان‌داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۲۱) نشان‌داده شده است، مقاومت اتصال (Mn)، حداکثر ممانی است که اتصال می‌تواند تحمل نماید. مقاومت اتصال را می‌توان براساس مدل حالت حدی نهایی اتصال و یا از آزمایش فیزیکی تعیین نمود. مقادیر مربوط به مقاوت اتصالات مدل‌سازی‌شده در جدول (٤) قابل‌مشاهده می‌باشد. همچنین در این جدول مقادیر مربوط به تغییرمکان انتهای تیر در لحظهٔ جاری‌شدن بخشی از اجزای اتصال (Dy)، مقدار نیرو در لحظهٔ جاری‌شدن (Ry)، زاویهٔ دریفت میان طبقه در لحظهٔ جاری‌شدن بخشی از اجزای اتصال (θy)، حداکثر نیروی قابل‌تحمل اتصال (Rmax) و مقدار نیرو در تغییرمکان ۱۰۰ میلی‌متر (R100) را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد.



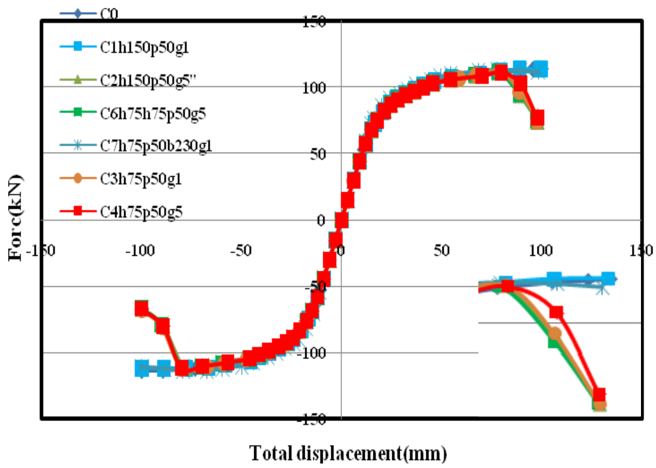

شکل ۲۰ نحوهٔ محاسبهٔ تغییرمکان و دوران اتصال [15]




شکل ۲۱ محاسبهٔ مقاومت اتصال براساس نمودار لنگر دوران [16]

جدول ٤ مقادیر $D_y$، $R_y$، $\theta_y$، $R_{max}$، $R_{100}$ و $M_n$ برای نمونه‌های مختلف

| نمونه | $D_y$ (mm) | $R_y$ (kN) | $\theta_y$ (rad.) | $R_{max}$ (kN) | $R_{100}$ (kN) | Mn (kN.m) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| C0 | 16.35 | 71.78 | 0.0163 | 113.73 | 113.73 | 113.73 |
| C1h150p50g1 | 16.66 | 72.91 | 0.0167 | 113.93 | 111.35 | 113.93 |
| C2h150p50g5 | 116.33 | 71.87 | 0.0177 | 111.85 | 67 | 111.85 |
| C3h75p50g1 | 16.33 | 71.93 | 0.0163 | 112.03 | 67.6 | 112.03 |
| C4h75p50g5 | 16.33 | 71.89 | 0.0163 | 111.9 | 66.8 | 111.9 |
| C5h75h75p50g1 | 16.33 | 72.2 | 0.0163 | 112.13 | 66.5 | 112.13 |
| C6h75h75p50g5 | 16.33 | 71.92 | 0.0163 | 112.8 | 66.1 | 112.8 |
| C7h75p50b230g1 | 16.32 | 76.07 | 0.0163 | 113.57 | 110.91 | 113.57 |

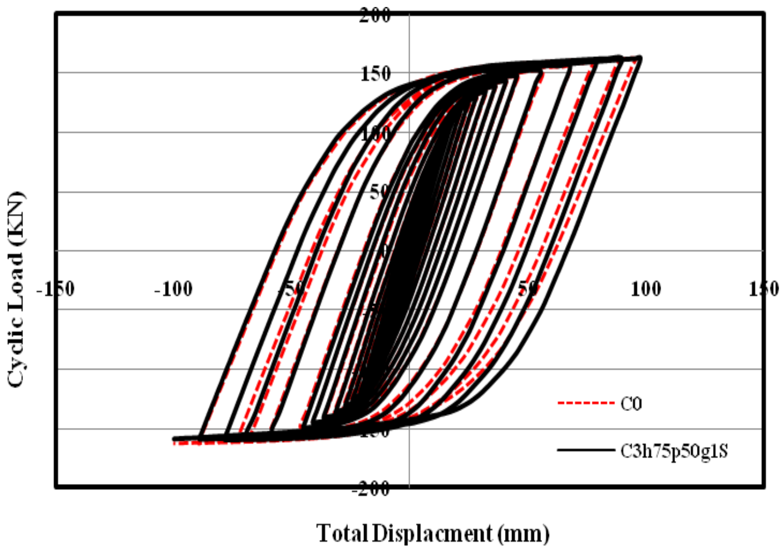



شکل ۲۲ منحنی اسکلتون نمونه‌های مختلف

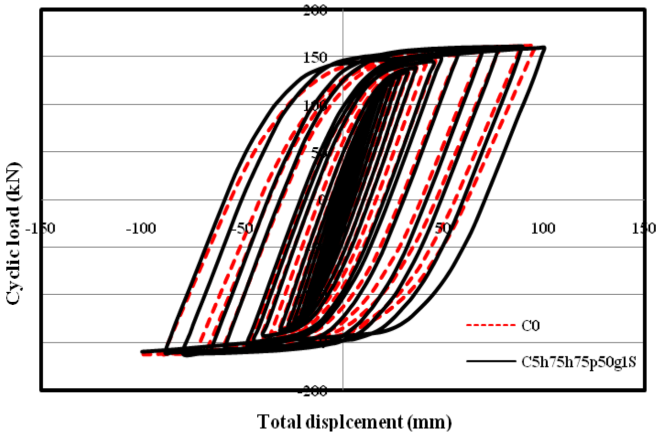
سه نوع قابی که در آیین‌نامهٔ AISC 2005 [16] بـه آنها اشاره شده اسـت، سـه سـطح مختلـف از ظرفیـت چرخشـی غیرالاسـتیک لـرزه‌ای موردانتظـار را شـامل می‌شوند. قـاب‌هـای خمشـی ویـژه (SMF) و متوسـط (IMF) به‌ترتیـب بـرای پـذیرش چـرخش غیرالاسـتیک ۰/۰۳ و ۰/۰۱ طراحـی مـی‌شـوند. قـاب‌هـای خمشـی معمولی (OMF) به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که بـه‌طـور قابل‌ملاحظه‌ای در حالت الاستیک باقی بماننـد و فـرض می‌شود که تغییرشکل‌های غیرالاستیک بسیار کمی داشته باشـند. درنتیجـه قـاب‌هـای خمشـی ویـژه، متوسـط و معمولی باید بتوانند بـه‌ترتیـب تغییرمکـان نسـبی طبقـهٔ ۰/۰٤، ۰/۰۲ و ۰/۰۱ رادیان را بپذیرند. باتوجه به مقادیر جدول (٤) مشاهده می‌شود که در تمامی نمونه‌ها اتصال قادر به تحمـل دوران بیشـتر از ۰/۰۱ رادیـان در ناحیـهٔ خطی و ۰/۰٤ رادیـان بـدون کـاهش در مقـدار نیـروی قابل‌تحمل می‌باشند که نشان‌دهندهٔ آن است که این فـرم سازه‌ای را می‌توان جزء قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری ویژه درنظر گرفت. همچنین مشـاهده مـی‌شـود کـه در برخی از نمونه‌ها پس از آنکه در تیـر مفصـل پلاسـتیک ایجاد گردید تیر دچار پیچش می‌شـود و مقـدار نیـروی قابل‌تحمل اتصال کـاهش پیـدا مـی‌نمایـد. شـکل (۲۲) نمودار اسکلتون مربوط به نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

## اثر تکیه‌گاه جانبی در انتهای تیر بر منحنی نیرو–تغییرمکان

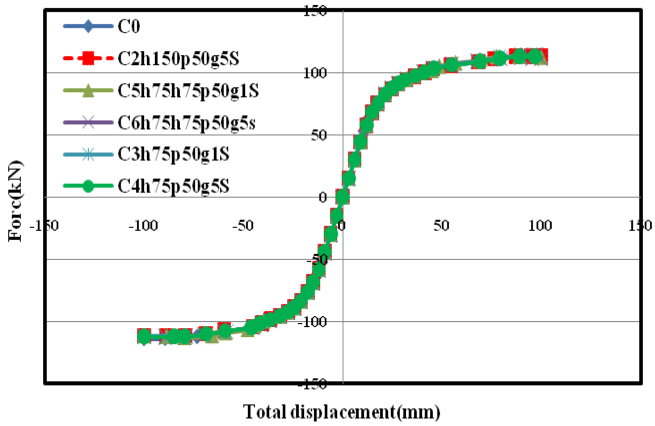
در قسمت قبل مشاهده شد در برخی حالـت‌هـا پـس از آنکه در تیر مفصل پلاستیک ایجاد می‌گـردد تیـر دچـار پیچش می‌شود و ظرفیت اتصال کاهش پیدا می‌کنـد. در این قسمت به بررسی اتصالات در حالتی که انتهای تیـر دارای مهار جانبی باشد پرداختـه مـی‌شـود. شـکل‌هـای (۲۳) و (۲٤) نمـــودار نیـــرو–تغییرمکـــان اتصـــالات C3h75p50g1 و C5h75h75p50g1 را در حالتی که تیر در انتها دارای مهار جانبی باشد بـه‌عنـوان نمونـه نشـان می‌دهد. نمودار سایر اتصالات در حالتی کـه تیـر دارای مهار جانبی در انتهـا باشـد بسـیار مشـابه مـی‌باشـد. در نام‌گذاری نمونه‌ها حرف s نشان‌دهندهٔ تکیه‌گـاه جـانبی در انتهای تیر مـی‌باشـد. شـکل (۲۵) نمـودار اسـکلتون نمونه‌ها را در حالتی که تیر دارای مهارجانبی باشد نشان می‌دهد.




شکل ۲۳ منحنی نیرو– تغییرمکان در اتصال C3h75p50g1S




شکل ٢٤ منحنی نیرو- تغییرمکان در اتصال C5h75h75p50g1S



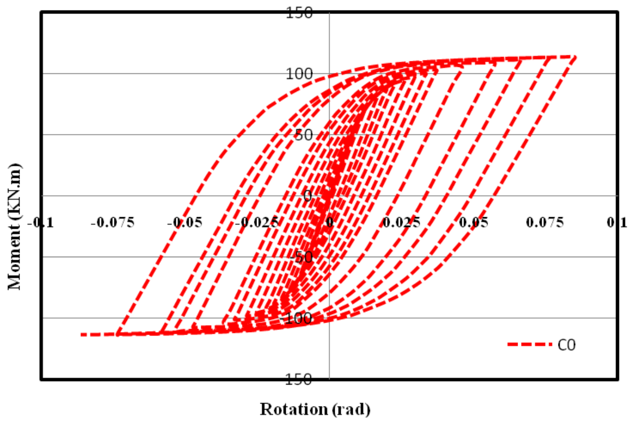

شکل ٢٥ منحنی اسکلتون نمونه‌های دارای مهارجانبی

## بررسی منحنی لنگر-دوران چشمه اتصال

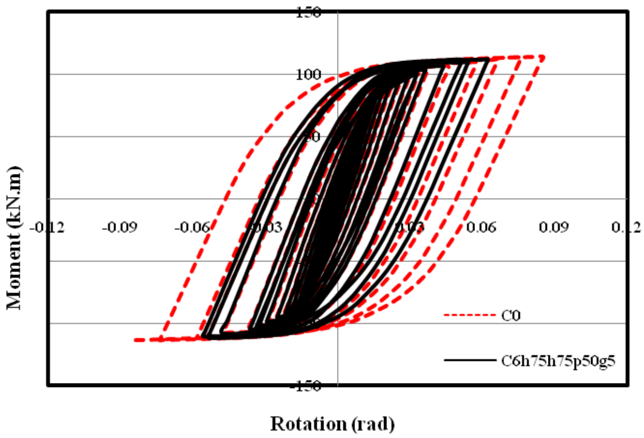
در این قسمت منحنی لنگر-دوران چشمه اتصال برای هریک از اتصالات قسمت قبل محاسبه و ترسیم می‌گردد. مقدار لنگر وارد بر اتصال از ضرب نمودن نیروی اعمال‌شده بر انتهای تیر در فاصلهٔ انتهای تیر تا مرکز ستون (فاصلهٔ L در شکل ١٩) و مقدار دوران با توجه به رابطهٔ (١) تعیین می‌گردد. شکل (٢٦) منحنی لنگر-دوران اتصال C0 را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود این اتصال دارای ظرفیت شکل‌پذیری بالایی می‌باشد به‌طوری‌که می‌تواند دوران بیشتر از ٠/٠٨ رادیان را بدون کاهش در ظرفیت اتصال تحمل نماید. شکل (٢٧) منحنی لنگر دوران مربوط به اتصال C6h75h75p50g5 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که چون تیر دارای مهار جانبی نمی‌باشد دچار پیچش می‌شود و ظرفیت دورانی اتصال کاهش پیدا می‌کند. سایر اتصالات نیز، چنین وضعیتی را دارا می‌باشند. شکل (٢٨) منحنی لنگر-دوران اتصال C6h75h75p50g5 را در حالت درنظر گرفتن مهار جانبی برای تیر نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود چنانچه تیر دارای مهار جانبی باشد و از دو مقطع هرمی‌شکل استفاده گردد سطح زیر نمودار و ظرفیت جذب انرژی اتصال افزایش می‌یابد. سطح زیر نمودار لنگر- دوران نمونهٔ C7h75h50b230g1 نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است. این امر نشان‌دهندهٔ عملکرد بهتر و ظرفیت جذب انرژی بیشتر آن نسبت به سایر نمونه‌ها می‌باشد که در شکل (٢٩) قابل‌مشاهده می‌باشد.

$$R=(UD-DD)/H \quad (۱)$$

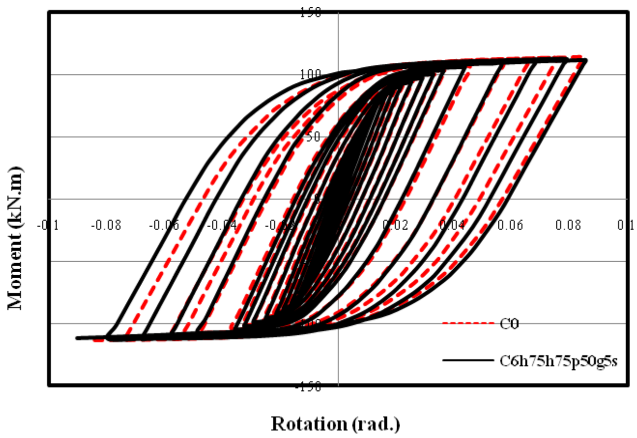
در رابطه فوق R دوران چشمه اتصال، UD تغییر مکان بالای قوطی، DD تغییرمکان پایین قوطی، H ارتفاع قوطی می‌باشد.



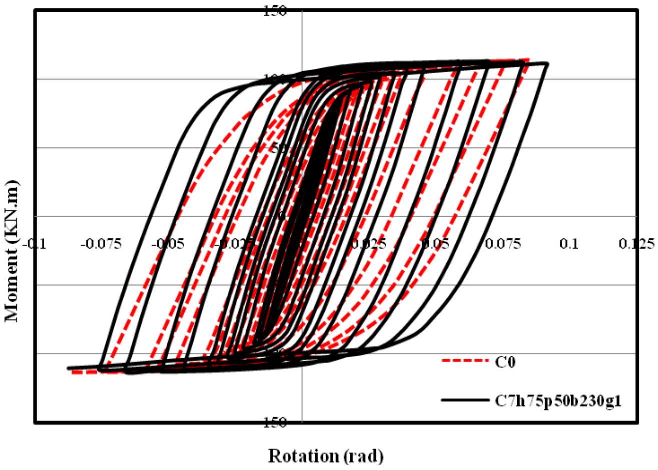

شکل ۲۶ منحنی لنگر-دوران اتصال C0



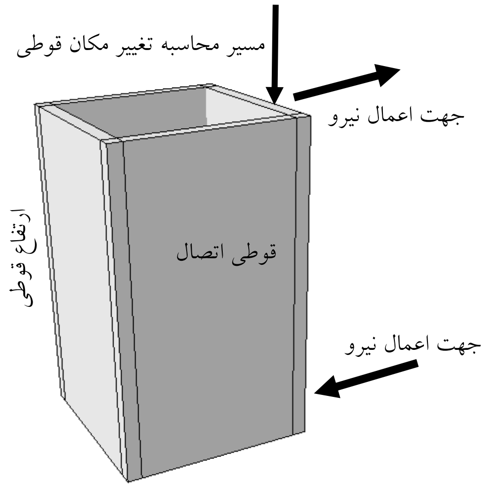

شکل ۲۷ منحنی لنگر-دوران اتصال C6h75h75p50g5




شکل ۲۸ منحنی لنگر-دوران اتصال C6h75h75p50g5s



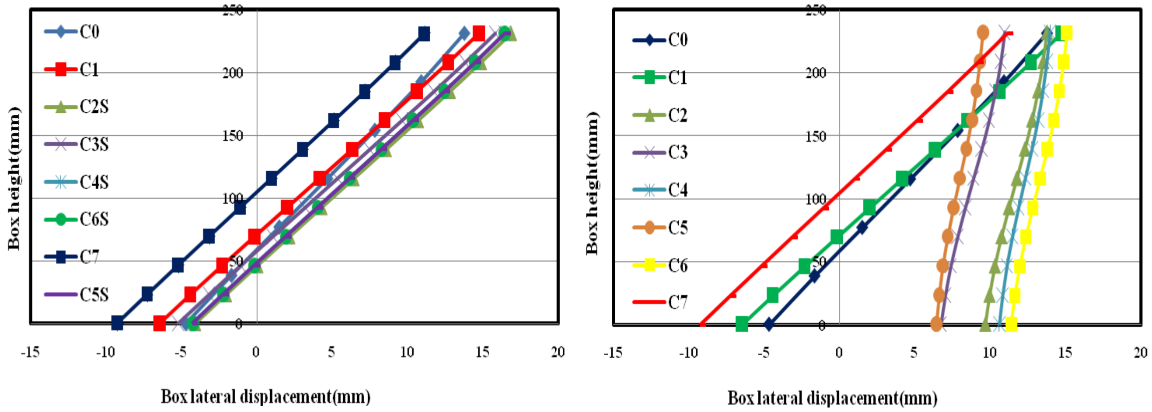

شکل ۲۹ منحنی لنگر-دوران اتصال C7h75h50b230g1




شکل ۳۰ نحوهٔ محاسبهٔ تغییرمکان افقی قوطی اتصال

درادامه برای بررسی نحوهٔ تغییرشکل قسمت قوطی‌شکل اتصال در انتهای بارگذاری منحنی‌های مربوط به تغییرشکل افقی قوطی برای اتصالات مختلف در حالت با و بدون تکیه‌گاه جانبی رسم شده است. شکل (۳۰) نحوه و مسیر محاسبه و شکل (۳۱) مقادیر این تغییرمکان را نشان می‌دهد. جدول (۵) مقدار تغییر مکان بالا و پایین قوطی اتصال و میزان دوران چشمه اتصال را در زمانی که مقدار تغییرمکان انتهای تیر برابر با ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد نشان می‌دهد.

شکل (۳۱) و جدول (۵) نشان می‌دهد که در بسیاری از نمونه‌ها چنانچه تیر دارای تکیه‌گاه جانبی نباشد، تغییرمکان بالا و پایین قوطی مثبت می‌شود و سبب کاهش میزان دوران چشمه اتصال می‌گردد. در تمامی نمونه‌ها دارای تکیه‌گاه جانبی و بعضی از نمونه‌های بدون تکیه‌گاه جانبی چشمه اتصال قادر به تحمل دورانی برابر با ۰/۰۸ رادیان می‌باشد. در تمامی نمونه‌ها جابه‌جایی بالای قوطی از پایین آن بیشتر می‌باشد اما در نمونهٔ C7h75p50b230g1 این مقادیر خیلی به‌هم نزدیک‌تر است و تغییرمکان قوطی تقریباً متقارن می‌باشد.




شکل ۳۱ منحنی تغییرمکان جانبی قسمت قوطی‌شکل اتصال (تغییرمکان ۱۰۰ میلی‌متر)

جدول ۵ مقادیر تغییرمکان بالا و پایین قوطی اتصال و مقدار دوران چشمه اتصال در زمان $D_{100}$

| دوران چشمه اتصال(.rad) | تغییرمکان پایین قوطی(mm) | تغییرمکان بالای قوطی(mm) | نمونه | دوران چشمه اتصال(.rad) | تغییرمکان پایین قوطی(mm) | تغییرمکان بالای قوطی(mm) | نمونه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0886 | -9.26 | 11.13 | C7h75p50b230g1 | 0.08 | -4.69 | 13.75 | C0 |
| 0.091 | -4.07 | 16.83 | C2h150p50g5S | 0.092 | -6.47 | 14.73 | C1h150p50g1 |
| 0.091 | -5.20 | 15.80 | C3h75p50g1S | 0.0177 | 9.67 | 13.75 | C2h150p50g5 |
| 0.091 | -3.75 | 17.07 | C4h75p50g5S | 0.0183 | 6.70 | 10.9 | C3h75p50g1 |
| 0.089 | -4.26 | 16.32 | C5h75h75p50g1S | 0.0147 | 10.59 | 13.97 | C4h75p50g5 |
| 0.09 | -4.25 | 16.45 | C6h75h75p50g5S | 0.0135 | 6.41 | 9.51 | C5h75h75p50g1 |
| | | | | 0.016 | 11.38 | 15.07 | C6h75h75p50g5 |

## نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش پیشنهادی برای اجرای راحت‌تر و سریع‌تر اتصال پیش‌ساخته مدولار فولادی ارائه گردید و سپس به بررسی اندرکنش قسمت هرمی‌شکل با اجزای این اتصال پرداخته شد که مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده به‌شرح زیر است:

۱. تمامی نمونه‌ها قادر به تحمل دوران بیشتر از ۰/۰۱ رادیان در قسمت خطی و حداقل ۰/۰۶ رادیان تا قبل از گسیختگی بدون کاهش در مقدار نیروی قابل تحمل می‌باشند که نشان‌دهندهٔ ظرفیت دورانی بالای این اتصال می‌باشد و همچنین بیانگر آن است که این فرم سازه‌ای جزء قاب‌های خمشی با شکل‌پذیری بالا محسوب می‌گردد.

۲. باتوجه به شکل‌های (۱۱) الی (۲۱) مشخص می‌گردد که چنانچه ابعاد قسمت هرمی‌شکل و فاصلهٔ آزاد بین آن با قسمت قوطی‌شکل مناسب انتخاب نشود، پس از آنکه در تیر مفصل پلاستیک ایجاد گردید تیر دچار پیچش می‌شود و مقاومت اتصال کاهش پیدا می‌کند. بیشترین کاهش مربوط به نمونهٔ C6h75h75p50g5 است که مقدار کاهش آن برابر با ۴۲ درصد می‌باشد، درنتیجه استفاده از تکیه‌گاه جانبی الزامی می‌باشد.

۳. در تمامی نمونه‌هایی که تیر دارای تکیه‌گاه جانبی می‌باشد، استفاده از قسمت هرمی‌شکل سبب افزایش

سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان و درنتیجه بهبود عملکرد و افزایش ظرفیت جذب انرژی اتصال می‌گردد.

٤. شکل (٨) نشان می‌دهد که استفاده از قسمت هرمی‌شکل برروی ورق‌های اتصال سبب کاهش مقدار تنش در آن ورق می‌شود که این میزان کاهش در بارگذاری‌های بزرگ محسوس‌تر می‌باشد.

٥. شکل‌های (١٩) و (٢٩) نشان می‌دهد بهترین عملکرد حالتی است که قسمت هرمی‌شکل برروی ورق اتصال ستون طبقهٔ پایین و یک مقطع قوطی‌شکل بر روی ورق اتصال ستون طبقهٔ بالا قرار گیرد و این دو قسمت به‌صورت لگو داخل یکدیگر قرار گیرند. در این حالت سطح زیر نمودار نیرو-تغییرمکان و ظرفیت جذب انرژی اتصال بیشترین مقدار می‌باشد.

٦. مقادیر جدول (٤) نشان می‌دهد که اضافه نمودن زائدهٔ هرمی‌شکل تأثیر زیادی بر مقاومت اتصال (Mn) ندارد.

٧. بهترین حالتی که هم عملکرد اتصال مناسب باشد و هم اجرای آن خیلی راحت‌تر باشد حالتی است که از دو قسمت هرمی‌شکل برروی صفحات اتصال ستون‌های بالا و پایین استفاده گردد؛ مشروط به آنکه تیر دارای مهار جانبی باشد. همچنین بهترین مقدار فاصلهٔ آزاد بین قسمت هرمی‌شکل و مقطع قوطی‌شکل تیر برابر با مقدار لقی سوراخ پیچ می‌باشد که کمک بسیاری به اجرای راحت‌تر و بهتر ستون می‌نماید.

## مراجع


1. Bravo Miguel, A. and Herrera Ricardo, A., "Performance under Cyclic Load of Built-up T-Stubs for Double T Moment Connections", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 103, PP. 117-130, (2014).
2. Sofias, C.E., Kalfas, C.N. and Pachoumis, D.T., "Experimental and FEM Analysis of Reduced Beam Section Moment Endplate Connections under Cyclic Loading", Engineering Structures, Vol. 59, PP. 32-329, (2014).
3. Min Yang, C. and Moon Kim, Y., "Cyclic Behavior of Bolted and Welded Beam-to-Column Joints", *Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 49, PP. 635-649, (2007).
4. Liu, X.C., Pu, S.H., Zhang, A.L., Xu, A.X., Ni, Z., Sun, Y. and Ma, L., "Static and Seismic Experiment for Bolted-welded Joint in Modularized Prefabricated Steel Structure", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 115, PP. 417–433, (2015).
5. Ghassemieh, M., Jalalpour, M. and Akbar Gholampour, A., "Numerical Evaluation of the Extended Endplate Moment Connection Subjected to Cyclic Loading", Current Advances in Civil Engineering, Vol. 2, PP. 35-43, (2014).
6. AlHendi, H. and Celikag, M., "Parametric Study on Moment–Rotation Characteristics of Reverse Channel Connections to Tubular Columns", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 104, PP. 261–273, (2015).
7. Kulkarni Swati, A. and Gaurang, V., "Study of Steel Moment Connection with and without Reduced Beam Section", Case Studies in Structural Engineering, Vol. 1, PP. 26–31, (2014).

8. Gerami, M., Saberi, H., Saberi, V. and Saedi Daryan, A., "Cyclic Behavior of Bolted Connections with Different Arrangement of Bolts", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 67, PP. 690-705, (2010).
9. Shi, G., Shi, Y. and Wang, Y., "Behaviour of End-Plate Moment Connections under Earthquake Loading", *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 5, PP. 703- 716, (2007).
10. Settleco, P., "Pinned I Beam to RHS Columns with Stiffness", *Journal of Structural Devision, ASCE*, Vol. 107(07), PP. 2214-2227, (1981).
11. Miura, K. and Makino, Y., "Testing of Beam-to-RHS Column Connections without Weld Access Holes", *Proceeding of 11th Int. offshore and Polar Engineering Conference*, Stranger, Norway, (2001).
12. Goswami, R. and Murty, C.V.R., "Externally reinforced welded I-Beam-to Box-Column Seismic Connection", *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, Vol. 136, No.1, PP. 23-30, (2010).
13. Salmon, C. G., Johnson, J. E., and Malhas, F. A., "Steel Structure Design and Behavior", 5rd ed., Prentice Hall, Publisher, New York, (2008).
14. ATC-24., "Guidelines of Cyclic Seismic Testing on Components for Steel structures", Redwood City, California: APPlied Technology Council (1992).
15. FEMA. Recommended seismic design criteria for new steel moment frame buildings. Report no. FEMA-350. Federal Emergency Management Agency: California Universities for Research in Earthquake Engineering; (2000):
16. California Universities for Research in Earthquake Engineering; AISC, American Institute of Steel Construction, "Specification for Structural Steel Buildings", Chicago, (2005).